

Pierre Mayé

LES ALIMENTATIONS ÉLECTRONIQUES

Alimentations linéaires et à découpage •
Piles et accumulateurs • Récolte d'énergie

3^e édition

DUNOD

Illustration de couverture : cobracz – fotolia.com

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage. Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements		d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).
--	--	--

© Dunod, 2018

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-078557-5

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.



TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1 - PRÉSENTATION	1
1.1 Rôle de l'alimentation	1
1.2 Alimentation à partir du réseau	2
1.2.1 Caractéristiques du réseau	2
1.2.2 Pollution harmonique	3
1.2.3 Alimentation non stabilisée	3
1.2.4 Alimentation stabilisée ou régulée	4
1.2.5 Alimentation haute tension	5
1.2.6 Alimentation sans isolement	5
1.3 Alimentation à partir d'un générateur électrochimique	5
1.3.1 Types de générateur électrochimique	5
1.3.2 Convertisseur de tension linéaire	5
1.3.3 Convertisseur de tension à découpage	6
1.3.4 Convertisseur de tension sans bobinage	6
1.4 Alimentation par récolte d'énergie	6
1.4.1 Principes utilisés	6
1.4.2 Convertisseur de tension continue sans bobinage	6
1.4.3 Redresseur élévateur	6
CHAPITRE 2 - TRANSFORMATEUR	7
2.1 Principe	7
2.2 Transformateur idéal	10
2.3 Transformateur réel	13
2.4 Transformateur en charge sur redresseur	17
2.5 Mise sous tension d'un transformateur	23
2.6 Configuration des enroulements	25
2.6.1 Transformateur à plusieurs secondaires	25
2.6.2 Transformateur à secondaires à prises intermédiaires	26
2.7 Caractéristiques technologiques	27
CHAPITRE 3 - REDRESSEURS ET FILTRES CAPACITIFS	28
3.1 Diode	28
3.1.1 Diode idéale	28
3.1.2 Diode à jonction	29
3.1.3 Modélisation	30
3.1.4 Limites d'utilisation	31
3.1.5 Caractéristiques électriques	32

3.2	Types de redresseurs	33
3.2.1	Redresseur monophasé	33
3.2.2	Redresseur biphasé à simple voie	34
3.2.3	Redresseur biphasé à double voie	36
3.3	Caractéristiques d'un redresseur monophasé	37
3.3.1	Principe	37
3.3.2	Influence des imperfections des composants	46
3.3.3	Cas particulier d'une faible ondulation	50
3.3.4	Calculs approchés	54
3.3.5	Surintensité à la mise sous tension	58
3.3.6	Choix des composants	59
3.3.7	Courbes de Schade	61
3.4	Caractéristiques d'un redresseur biphasé	65
3.4.1	Principe	65
3.4.2	Influence des imperfections des composants	68
3.4.3	Cas particulier d'une faible ondulation	69
3.4.4	Calculs approchés	71
3.4.5	Surintensité à la mise sous tension	72
3.4.6	Choix des composants	76
3.4.7	Courbes de Schade	80
3.4.8	Simulation numérique	84
3.5	Comparaison des trois montages	86
3.6	Pollution harmonique	87
3.6.1	Phénomène	87
3.6.2	Norme	90
3.7	Redresseur à appel de courant sinusoïdal	91
CHAPITRE 4 - STABILISATEURS ET RÉGULATEURS – GÉNÉRALITÉS		93
4.1	Classification	93
4.1.1	Stabilisateur et régulateur	93
4.1.2	Régulateur de tension et régulateur de courant	93
4.1.3	Régulateur linéaire et régulateur à découpage	94
4.1.4	Régulateur de tension positive ou négative	96
4.1.5	Régulateur abaisseur, élévateur ou inverseur	96
4.2	Grandeurs caractéristiques	97
CHAPITRE 5 - STABILISATEURS DE TENSION		100
5.1	Propriétés de la diode Zener	100
5.1.1	Caractéristique	100
5.1.2	Modélisation	103
5.1.3	Influence de la température	104
5.1.4	Association de diodes Zener	107
5.1.5	Association d'une diode Zener et de diodes ordinaires	107
5.1.6	Bruit	108
5.2	Stabilisateur parallèle à diode Zener	108
5.2.1	Principe	108
5.2.2	Choix des composants	109
5.2.3	Coefficients de stabilisation	111

5.3	Stabilisateur parallèle à diode Zener et transistor	114
5.3.1	Principe	114
5.3.2	Choix des composants	115
5.3.3	Coefficients de stabilisation	116
5.3.4	Avantages et inconvénients	119
5.4	Stabilisateur série à diode et transistor	119
5.4.1	Principe	119
5.4.2	Choix des composants	120
5.4.3	Coefficients de stabilisation	122
5.4.4	Augmentation de la puissance	124
5.4.5	Avantages et inconvénients	126
CHAPITRE 6 - RÉGULATEURS DE TENSION LINÉAIRES		127
6.1	Régulateur à amplificateur opérationnel	127
6.1.1	Principe	127
6.1.2	Coefficients de régulation	128
6.1.3	Réglage de la tension	132
6.1.4	Augmentation du courant de sortie	134
6.1.5	Régulateur double	134
6.1.6	Influence des imperfections de l'amplificateur opérationnel	135
6.1.7	Choix des composants	137
6.2	Régulateur intégré à usage multiple	140
6.2.1	Caractéristiques	140
6.2.2	Régulateur série	142
6.2.3	Augmentation du courant de sortie	146
6.2.4	Régulateur parallèle	149
6.3	Régulateur de tension fixe à trois bornes	150
6.3.1	Caractéristiques	151
6.3.2	Montage de base (régulateur de tension positive)	152
6.3.3	Montage de base (régulateur de tension négative)	156
6.3.4	Augmentation du courant de sortie	158
6.3.5	Modification de la tension de sortie	162
6.3.6	Régulateur pour tension d'entrée élevée	168
6.3.7	Inhibition d'un régulateur	169
6.3.8	Obtention de deux tensions différentes	170
6.3.9	Régulateur double	171
6.3.10	Régulateur double à tension réglable	172
6.4	Régulateur de tension réglable à trois bornes	174
6.4.1	Caractéristiques	175
6.4.2	Montage de base (régulateur de tension positive)	178
6.4.3	Montage de base (régulateur de tension négative)	182
6.4.4	Réglage de la tension	183
6.4.5	Commutation de la tension de sortie	185
6.4.6	Amélioration de la stabilité	187
6.4.7	Augmentation du courant de sortie	189
6.4.8	Inhibition	192
6.4.9	Mise sous tension progressive	192
6.4.10	Régulateur double	193

6.5	Autres régulateurs intégrés	194
6.5.1	Régulateur de tension et de courant réglable	194
6.5.2	Régulateur haute tension	201
6.5.3	Régulateur à faible chute de tension	202
6.5.4	Régulateur à faible consommation	205
6.5.5	Régulateur parallèle	207

CHAPITRE 7 - STRUCTURES DES CONVERTISSEURS

	À DÉCOUPAGE	213
7.1	Convertisseurs à bobines	213
7.1.1	Convertisseur abaisseur	213
7.1.2	Convertisseur élévateur	228
7.1.3	Convertisseur inverseur	239
7.2	Convertisseurs à transformateur	247
7.2.1	Convertisseur à récupération d'énergie	247
7.2.2	Convertisseur à transfert direct	252
7.2.3	Convertisseur en demi-pont	256
7.2.4	Convertisseur en pont	258
7.2.5	Convertisseur symétrique	258
7.3	Modélisation du comportement dynamique	259
7.3.1	Schéma équivalent moyen	259
7.3.2	Fonctions de transfert	260
7.3.3	Généralisation	261
7.4	Choix des composants	262
7.4.1	Interrupteurs	262
7.4.2	Diodes de roue libre	263
7.4.3	Bobines et transformateurs	263
7.4.4	Condensateurs de filtrage	268
7.5	Redresseur synchrone	269

CHAPITRE 8 - RÉGULATEURS DE TENSION À DÉCOUPAGE

8.1	Principes	271
8.1.1	Circuits en mode tension	271
8.1.2	Circuits en mode courant	276
8.2	Circuits intégrés spécialisés	277
8.3	Exemples de régulateurs abaisseurs	285
8.3.1	Montage utilisant un circuit intégré SG3524	285
8.3.2	Montage utilisant un circuit intégré LM3578	289
8.3.3	Montage utilisant un circuit intégré TL497	293
8.3.4	Montage utilisant un circuit intégré μ A78S40	297
8.4	Exemples de régulateurs élévateurs	302
8.4.1	Montage utilisant un circuit intégré LM3578	302
8.4.2	Montage utilisant un circuit intégré TL497	305
8.4.3	Montage utilisant un circuit intégré μ A78S40	308
8.5	Exemples de régulateurs inverseurs	312
8.5.1	Montage utilisant un circuit intégré LM3578	312
8.5.2	Montage utilisant un circuit intégré TL497	317
8.5.3	Montage utilisant un circuit intégré μ A78S40	320

8.6	Exemples de régulateurs à transformateur	325
8.6.1	Régulateur à récupération d'énergie sans isolement de la commande	325
8.6.2	Procédés d'isolement de la commande	326
8.6.3	Alimentation à découpage branchée sur le secteur	328
8.7	Modélisation des régulateurs à découpage	332
8.7.1	Schéma-bloc	332
8.7.2	Stabilité.	333
8.8	Logiciel spécialisé	334
8.8.1	Présentation.	335
8.8.2	Exemple d'utilisation	335

CHAPITRE 9 - STABILISATEURS ET RÉGULATEURS DE COURANT . . 337

9.1	Stabilisateur de courant à transistor et diode Zener	337
9.1.1	Principe.	337
9.1.2	Choix des composants.	338
9.1.3	Coefficients de stabilisation	340
9.2	Régulateur de courant à amplificateur opérationnel	342
9.2.1	Principe.	342
9.2.2	Coefficients de régulation	343
9.3	Régulateur de courant utilisant un régulateur de tension à trois bornes.	345
9.3.1	Montage avec un régulateur de tension fixe	345
9.3.2	Montage avec un régulateur de tension réglable	346
9.3.3	Réglage du courant de sortie	347
9.3.4	Montage avec un régulateur de tension et de courant réglable	350
9.4	Régulateur de tension et de courant.	350
9.4.1	Principe.	350
9.4.2	Montage utilisant deux régulateurs intégrés	351
9.4.3	Montage avec un régulateur de tension et de courant réglable	353

CHAPITRE 10 - PROTECTION ET SURVEILLANCE DES ALIMENTATIONS 354

10.1	Protections contre les surintensités	354
10.1.1	Fusible	354
10.1.2	Protection par limitation de courant.	355
10.1.3	Limiteur à courant constant	355
10.1.4	Limiteur par délestage.	357
10.2	Protections contre les surtensions	360
10.2.1	Principe.	361
10.2.2	Détecteur à diode Zener	362
10.2.3	Détecteur à diode Zener et amplificateur opérationnel	362
10.2.4	Circuit intégré spécialisé	364
10.3	Surveillance	367

CHAPITRE 11 - CONVERTISSEURS CONTINU-CONTINU

SANS BOBINAGE	369
11.1 Transferts de charges dans les condensateurs	369
11.1.1 Charge d'un condensateur par une source de tension	369
11.1.2 Transfert de charges entre deux condensateurs	375
11.1.3 Explication	378
11.1.4 Amélioration du rendement énergétique de la charge d'un condensateur	379
11.1.5 Conditions d'un bon rendement pour un convertisseur continu-continu sans bobinage	381
11.2 Principe d'une pompe de charges	383
11.2.1 Structure	383
11.2.2 Régime transitoire à vide	384
11.2.3 Régime permanent à vide	386
11.2.4 Régime permanent en charge	387
11.2.5 Convertisseur avec ou sans régulation	388
11.2.6 Réalisation des convertisseurs continu-continu sans bobinage	388
11.3 Convertisseurs à diodes	388
11.3.1 Obtention du signal carré	388
11.3.2 Convertisseur inverseur	393
11.3.3 Convertisseur élévateur	396
11.3.4 Convertisseur inverseur élévateur	398
11.4 Circuits intégrés spécialisés	399
11.4.1 Description	399
11.4.2 Convertisseur inverseur	402
11.4.3 Convertisseur élévateur	408
11.4.4 Choix des condensateurs	410
11.5 Pompe de charge de Dickson	410

CHAPITRE 12 - REDRESSEURS ÉLÉVATEURS DE TENSION

12.1 Généralités	414
12.1.1 Définition	414
12.1.2 Grandeurs caractéristiques	414
12.1.3 Terminologie	415
12.1.4 Ordres de grandeur	415
12.1.5 Applications	415
12.2 Redresseurs doubleurs de tension	416
12.2.1 Doubleur de Schenkel	416
12.2.2 Doubleur de Latour	426
12.2.3 Doubleur en pont	434
12.3 Redresseurs multiplicateurs	439
12.3.1 Tripleur	439
12.3.2 Quadripleur	440
12.3.3 Multiplicateur de Greinacher	441
12.3.4 Multiplicateur symétrique	448
12.3.5 Multiplicateur hybride	450

CHAPITRE 13 - ALIMENTATIONS SANS ISOLEMENT	452
13.1 Alimentation d'une diode électroluminescente à partir du secteur. .	452
13.2 Alimentation d'une charge quelconque	457
13.3 Quelques variantes	461
13.3.1 Simplification	461
13.3.2 Alimentation symétrique	461
13.3.3 Redressement en pont	462
13.3.4 Stabilisation ou régulation de la tension de sortie	463
13.4 Lampes à LED	466
CHAPITRE 14 - ÉCHAUFFEMENT DES COMPOSANTS	468
14.1 Étude générale des échanges thermiques.	468
14.1.1 Lois de base.	468
14.1.2 Analogie électrique.	470
14.1.3 Échauffement en régime continu	471
14.1.4 Échauffement en régime variable	472
14.2 Application aux composants électroniques	474
14.2.1 Puissance dissipée	474
14.2.2 Échauffement d'un composant seul	475
14.2.3 Échauffement d'un composant muni d'un dissipateur thermique	477
CHAPITRE 15 - ALIMENTATIONS COMPLÈTES	480
15.1 Alimentations d'équipements	480
15.1.1 Différents types.	480
15.1.2 Critères de choix.	481
15.2 Alimentations de laboratoire	484
15.3 Mesures et tests	485
15.3.1 Caractéristique statique	485
15.3.2 Ondulation	486
15.3.3 Qualité de la régulation.	487
CHAPITRE 16 - GÉNÉRATEURS ÉLECTROCHIMIQUES	488
16.1 Généralités	488
16.1.1 Définition	488
16.1.2 Classification	488
16.1.3 Types de générateurs électrochimiques utilisés.	489
16.2 Circuits électroniques associés	489
16.2.1 Types de circuits utilisés	489
16.2.2 Exemples de régulateurs linéaires	490
16.2.3 Exemples de régulateurs à découpage	491
16.2.4 Exemples de régulateurs à pompe de charge	492

CHAPITRE 17 - RÉCOLTE D'ÉNERGIE	494
17.1 Présentation	494
17.1.1 Définition	494
17.1.2 Utilisation	494
17.1.3 Principes mis en jeu	494
17.2 Récolte d'énergie mécanique de vibrations par transducteur piézoélectrique.	495
17.2.1 Énergie disponible	495
17.2.2 Effet piézoélectrique	495
17.2.3 Dispositif de récolte.	495
17.2.4 Circuit électronique associé	496
17.3 Récolte d'énergie de rayonnement lumineux par cellule photovoltaïque.	497
17.3.1 Énergie disponible	497
17.3.2 Effet photovoltaïque	497
17.3.3 Dispositif de récolte.	497
17.3.4 Circuit électronique associé	499
17.4 Récolte d'énergie électromagnétique par antenne redresseuse. . . .	500
17.4.1 Énergie disponible	500
17.4.2 Dispositif de récolte.	501
17.4.3 Circuit électronique associé	501
BIBLIOGRAPHIE	503
DOCUMENTATION DES CONSTRUCTEURS	505
BIOGRAPHIES	507
INDEX	511

P RÉSENTATION

1.1 Rôle de l'alimentation

Presque tous les montages électroniques exigent une alimentation continue. Il faut en effet fournir à un circuit l'énergie nécessaire pour fonctionner correctement en lui permettant de délivrer une puissance utile à sa charge et de compenser ses pertes internes inévitables (à cause de l'effet Joule). Il faut également mettre les composants dans les conditions où ils peuvent assurer leur fonction : on parle alors de polarisation.

Par exemple, quand on réalise un amplificateur audio, son alimentation fournit la puissance utile au haut-parleur et les pertes dans les résistances et les transistors du montage. De plus, la tension continue constante imposée par cette alimentation permet de fixer le point de repos des transistors afin d'obtenir le fonctionnement envisagé. Ainsi, l'étage de sortie sera polarisé en classe B en plaçant les transistors à leur limite de conduction. Les signaux d'entrée entraînent alors des variations des tensions et des courants qui constituent l'information à traiter. Par contre, la source de ces signaux ne fournit qu'une faible puissance (*figure 1.1*).

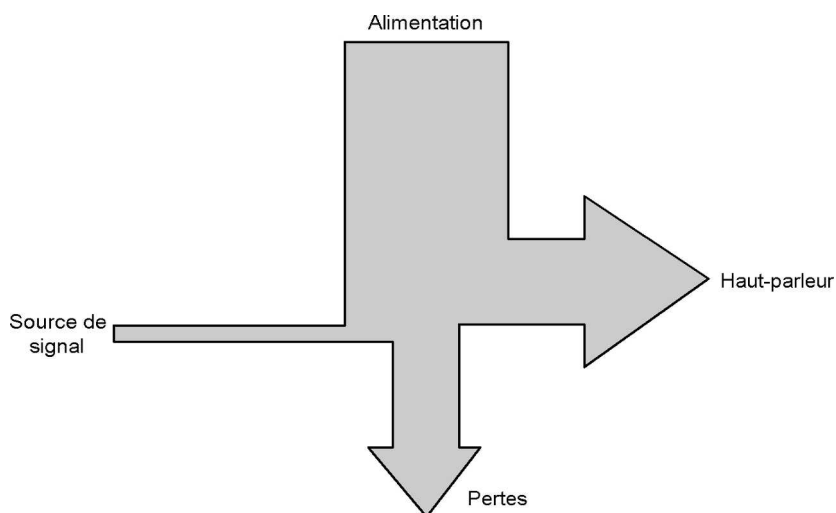


Figure 1.1 – Échanges énergétiques dans un amplificateur audio.

Lorsque l'alimentation est à l'intérieur d'un appareil et à son usage spécifique, on parle d'alimentation d'équipement. Il s'agit alors d'une ou de plusieurs sources de tensions continues selon les besoins du montage.

Un autre type d'alimentation répond à un besoin différent : l'alimentation de laboratoire. Il s'agit alors d'un appareil utile à l'électronicien pour ses manipulations et qui comprend une ou plusieurs sorties indépendantes délivrant des tensions ou des courants réglables par des potentiomètres accessibles sur la face avant et dont on peut lire les valeurs sur des indicateurs à aiguille ou à afficheurs électroluminescents. Le technicien peut ainsi disposer soit d'une source de tension avec limitation de courant, soit d'une source de courant avec limitation de tension. Ces fonctions sont très utiles pour relever les caractéristiques des composants ou alimenter les circuits en essai. De plus, l'alimentation de laboratoire possède des protections élaborées afin d'éviter les conséquences de manipulations erronées.

1.2 Alimentation à partir du réseau

Quand un appareil n'est pas mobile et que la puissance consommée n'est pas négligeable, on utilise des alimentations prélevant l'énergie sur le réseau de distribution électrique.

1.2.1 Caractéristiques du réseau

Le réseau monophasé délivre une tension sinusoïdale de fréquence et de valeur efficace données. En Europe, la fréquence nominale est $f = 50$ Hz et la valeur efficace nominale de la tension est $U = 230$ V.

Ces deux paramètres ne sont pas définis avec la même précision. La fréquence peut varier de 49,5 Hz à 50,5 Hz pendant 99,5 % d'une année et ne doit jamais sortir de l'intervalle 47 Hz à 52 Hz et la valeur efficace de la tension peut évoluer de ± 10 %, ce qui correspond à une plage de 207 V à 253 V. Les choix de composants dépendant de ces données doivent donc comporter des marges de sécurité suffisantes pour tenir compte de ces tolérances.

Il existe une norme européenne sur la qualité de la tension qui fait référence : la norme EN 50160. Adoptée par le Comité européen de normalisation électrique (CENELEC) en 1999, devenue norme française en 2000 et révisée en 2007 puis en 2011, cette norme définit des seuils pour un certain nombre de perturbations de l'onde de tension.

1.2.2 Pollution harmonique

Les courants harmoniques créés par les charges non linéaires comme les redresseurs entraînent de nombreux inconvénients pour le réseau : un surdimensionnement des installations (transformateurs, conducteurs, appareils de protection), un échauffement supplémentaire, un vieillissement prématuré de certains dispositifs et une éventuelle perturbation du fonctionnement des autres récepteurs. Ces phénomènes néfastes constituent la pollution harmonique.

Les limites autorisées pour les intensités efficaces des harmoniques de courant injectés par un appareil dans le réseau public d'alimentation basse tension sont précisées par la norme NF EN 61000-3-2 intitulée « Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 3-2 : limites – Limites pour les émissions de courant harmonique (courant appelé par les appareils inférieur ou égal à 16 A par phase) ».

1.2.3 Alimentation non stabilisée

Une alimentation à partir du réseau est un convertisseur alternatif-continu. La solution la plus simple pour créer une source de tension continue à partir de la tension alternative du réseau comporte un transformateur et un redresseur avec filtre. C'est une alimentation non stabilisée (*figure 1.2*).

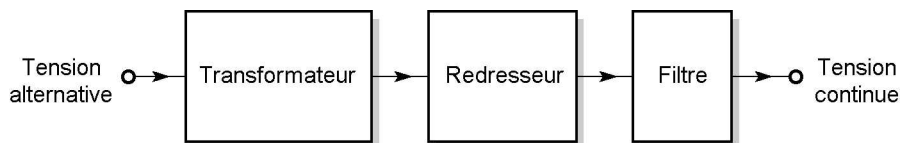


Figure 1.2 – Principe d'une alimentation non stabilisée.

Le transformateur permet à la fois d'assurer l'isolement entre l'appareil et le réseau et d'abaisser la valeur efficace de la tension pour la rendre compatible avec les niveaux habituellement exigés par les circuits électroniques. Son étude est menée au chapitre 2. L'isolement est souvent nécessaire, essentiellement pour des raisons de sécurité de l'utilisateur, mais aussi pour des problèmes de connexions entre appareils et de transmission des parasites.

Ensuite, le redresseur avec filtre permet de passer d'une tension alternative à une tension continue. Cette fonction est remplie par des circuits à diodes et condensateur qui sont détaillés au chapitre 3.

Le simple montage qui vient d'être décrit est en fait peu utilisé car la tension de sortie est facilement influencée par les perturbations et en particulier par la charge à alimenter. La qualité demandée pour les alimentations des circuits électroniques actuels exige une stabilisation, ou mieux, une régulation.

1.2.4 Alimentation stabilisée ou régulée

Structure classique

Un étage supplémentaire permet de limiter l'influence des perturbations sur la tension de sortie (*figure 1.3*).

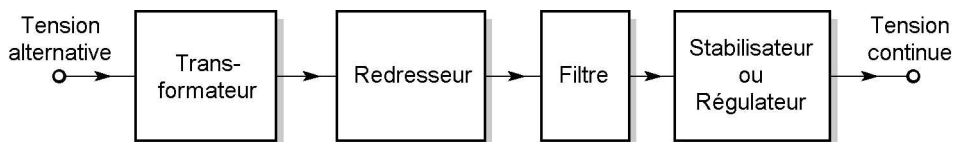


Figure 1.3 – Principe d'une alimentation stabilisée ou régulée (structure classique).

Si le circuit n'utilise que la non-linéarité de certains composants comme la diode Zener, on parle de stabilisateur. Tandis que si le montage fait appel à un asservissement, on le qualifie de régulateur.

L'élément qui agit sur la tension de sortie peut fonctionner soit en régime linéaire, soit en commutation (découpage). Le premier cas conduit à d'excellentes qualités en stabilisation et sa commande est assez facile. Par contre, le rendement est mauvais du fait des pertes importantes dans les composants actifs en régime linéaire. Le second cas permet d'atteindre un rendement plus élevé, mais il est source de parasites et il est un peu plus délicat pour sa commande. Le chapitre 4 expose quelques généralités sur la question et les chapitres 5 à 8 traitent successivement des stabilisateurs, des régulateurs linéaires puis des régulateurs à découpage.

Si les circuits cités jusqu'à présent constituent des sources de tension, on a parfois besoin de sources de courant, par exemple dans les alimentations de laboratoire. Le chapitre 9 étudie les montages qui permettent de convertir une tension en courant en assurant une stabilité correcte de ce dernier paramètre.

L'inconvénient de la structure classique décrite précédemment est d'employer un transformateur directement relié au réseau. Celui-ci est presque toujours nécessaire pour l'isolement, mais comme il fonctionne à 50 Hz, il est construit sur un noyau de fer lourd et encombrant.

Alimentation à découpage

Une alimentation à découpage a une structure différente (*figure 1.4*).

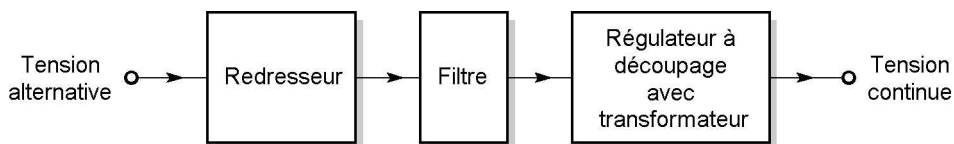


Figure 1.4 – Principe d'une alimentation à découpage.

Le redresseur avec filtre n'est pas isolé du réseau, mais c'est le régulateur à découpage qui contient un transformateur. Les diverses solutions sont évoquées aux

chapitres 7 et 8. L'intérêt est que le transformateur fonctionne à la fréquence élevée du découpage et qu'il est donc construit sur un noyau de ferrite moins lourd et moins encombrant. Toutefois, la régulation d'une telle alimentation est plus complexe puisque la boucle de retour doit elle aussi être isolée.

1.2.5 Alimentation haute tension

Quelques appareils ont besoin de tensions élevées pour fonctionner. Le chapitre 12 traite le cas particulier des redresseurs élévateurs qui permettent de répondre à cette demande.

1.2.6 Alimentation sans isolement

Dans certains cas exceptionnels, l'isolement du secteur n'est pas requis. La sécurité de l'utilisateur exige alors que l'ensemble du montage électronique soit placé dans un boîtier assurant un isolement adapté. On peut alors utiliser des montages simples et peu coûteux qui sont décrits au chapitre 13.

1.3 Alimentation à partir d'un générateur électrochimique

De plus en plus d'appareils électroniques sont portables. Il leur faut donc une alimentation autonome. Heureusement, l'évolution de la technologie permet de disposer de circuits électroniques dont la consommation est relativement faible. Un générateur électrochimique (pile, accumulateur ou plus rarement pile à combustible) peut être utilisé comme source d'énergie.

1.3.1 Types de générateur électrochimique

Les trois catégories de générateurs électrochimiques (pile, accumulateur, pile à combustible) utilisent différentes technologies ayant des performances variées. Le chapitre 16 résume les notions correspondantes.

1.3.2 Convertisseur de tension linéaire

La tension de sortie d'un générateur électrochimique n'est pas bien constante. Elle dépend de son état de charge et du courant débité. Il faut donc lui ajouter un régulateur pour obtenir une tension stable. De plus, on souhaite souvent obtenir une tension continue différente de celle qui est déjà disponible grâce à une pile ou une batterie. Abaisser le niveau peut être réalisé par un régulateur linéaire, identique dans son principe à ceux qui sont utilisés dans les alimentations à partir du réseau. Toutefois, les modèles à faible chute de tension et à faible consommation présentent un intérêt particulier dans ce domaine (chapitre 6).

1.3.3 Convertisseur de tension à découpage

Seuls les régulateurs à découpage sont capables d'abaisser ou d'élever une tension ou d'inverser sa polarité (chapitres 7 et 8).

1.3.4 Convertisseur de tension sans bobinage

Pour de faibles puissances, il existe des circuits un peu différents qui, tout en utilisant des composants actifs en commutation ne nécessitent pas de bobinage comme les régulateurs à découpage habituels. Ils sont traités au chapitre 11.

1.4 Alimentation par récolte d'énergie

Pour s'affranchir du changement de piles ou de la recharge des accumulateurs, certains appareils autonomes à faible consommation utilisent la récolte d'énergie.

1.4.1 Principes utilisés

La récolte d'énergie peut se faire à partir de sources variées et par des dispositifs utilisant différents principes. Cette technologie en plein développement est traitée au chapitre 17.

1.4.2 Convertisseur de tension continue sans bobinage

Quand la tension obtenue est continue, elle est souvent trop faible et il faut l'augmenter. C'est en général le rôle d'un convertisseur de tension continue sans bobinage (chapitre 11), mais ce sont les modèles fortement élevateurs qui sont alors nécessaires.

1.4.3 Redresseur élévateur

Quand la tension obtenue est alternative, il faut à la fois la redresser et augmenter son niveau. C'est le rôle de circuits analogues à ceux qui sont employés dans les alimentations haute tension, mais avec des ordres de grandeur totalement différents (chapitre 12).



TRANSFORMATEUR

Le transformateur est présent dans presque toutes les alimentations branchées sur le secteur. Il assure l'isolement entre le réseau et l'appareil. De plus, dans les alimentations classiques, il permet d'abaisser la tension efficace du secteur à une valeur compatible avec les nécessités des circuits électroniques.

L'étude du transformateur d'alimentation diffère des théories classiques de l'électrotechnique : d'une part, les courants ne sont pas sinusoïdaux et d'autre part, les approximations faites pour les transformateurs de forte puissance ne sont pas toujours justifiées pour les petites unités.

2.1 Principe

Un transformateur monophasé est constitué d'un noyau ferromagnétique fermé réalisé avec un matériau de forte perméabilité sur lequel sont placés deux enroulements. L'une de ces bobines, appelée *primaire*, est alimentée par une source de tension alternative. Un flux magnétique est alors créé dans le noyau. L'autre enroulement, nommé *secondaire*, est le siège d'une force électromotrice induite.

Si le circuit est fermé sur un récepteur, il apparaît un courant qui donne une force magnétomotrice s'opposant à celle du primaire. Comme le flux est imposé par la tension de la source alternative, la force magnétomotrice résultante est inchangée et le primaire appelle un courant qui permet le maintien de l'état magnétique du noyau. On peut ainsi transférer une puissance du primaire vers le secondaire sans aucun contact électrique.

Dans son principe, l'appareil est réversible, l'un quelconque des enroulements pouvant être choisi comme primaire. En pratique, le rôle des deux bobines est cependant bien défini.

Sur les schémas, un transformateur peut être représenté par l'un des deux symboles indiqués sur la *figure 2.1*. Le premier fait apparaître les deux enroulements, séparés par un trait qui rappelle la présence du noyau ferromagnétique.

Toutefois, ces symboles sont insuffisants pour connaître totalement le transformateur car les deux extrémités des enroulements ne sont pas équivalentes. En effet, le sens de bobinage détermine le sens du champ magnétique créé et donc les polarités

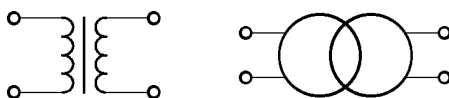


Figure 2.1 – Symboles d'un transformateur monophasé.

instantanées des tensions induites. Les deux possibilités sont le pas à gauche et le pas à droite (*figure 2.2*).

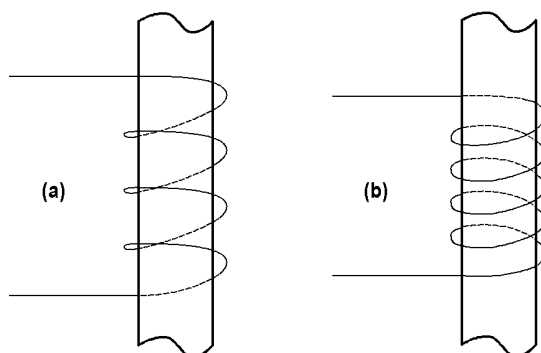


Figure 2.2 – Sens de bobinage : pas à gauche (a) et pas à droite (b).

L'important est de savoir si les deux enroulements sont de même sens ou de sens contraire. On a illustré les deux cas en représentant les deux bobines sur des colonnes opposées du circuit magnétique pour la clarté du schéma, bien que cela ne corresponde pas à la disposition réelle d'un transformateur (*figure 2.3*).

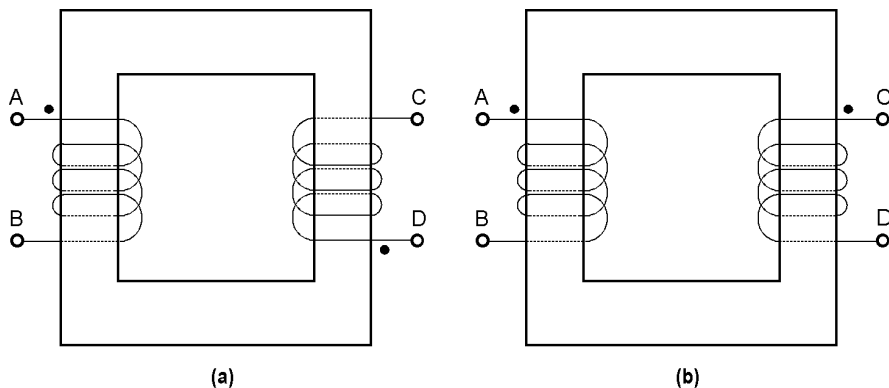


Figure 2.3 – Deux bobinages de même sens (a) ou de sens contraire (b).

Pour conserver une information sur les sens de bobinage avec le symbole du transformateur, une extrémité de chaque enroulement est munie d'un point (*figure 2.4*).

Ces bornes homologues correspondent à des points de même polarité instantanée. En effet, si à un instant donné la borne A du transformateur (a) est à une tension positive par rapport à l'autre extrémité B du primaire, le courant entre par A (le

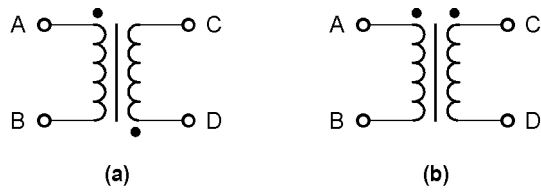


Figure 2.4 – Pointage des enroulements.

primaire est un récepteur) et crée un flux qui induit une force électromotrice dans le secondaire telle que la borne D soit positive par rapport à C. Si une charge est connectée sur le transformateur, le courant sortira à cet instant de la borne D (le secondaire est un générateur). Par contre, sur le transformateur (b), c'est la borne C qui serait positive par rapport à D à cet instant.

Avant de mettre en équations le transformateur, il est nécessaire de bien préciser les conventions de signe adoptées pour les différentes grandeurs électriques et magnétiques. Beaucoup de possibilités existent et il ne faut pas s'étonner de voir dans plusieurs ouvrages des formules qui diffèrent par leur signe : aucune n'est fautive, mais les auteurs ont simplement utilisé des conventions différentes. Pour notre part, nous choisirons les définitions qui suivent au plus près la réalité physique (figure 2.5).

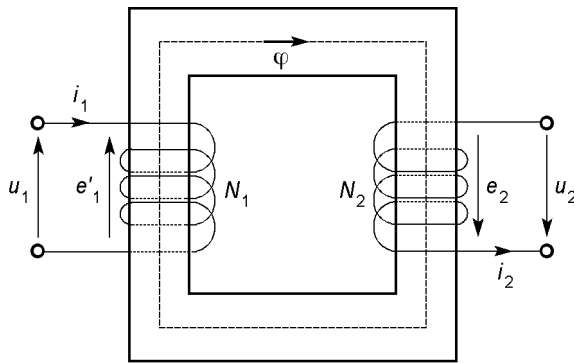


Figure 2.5 – Conventions de signe.

Ces conventions ont de plus l'avantage de faire apparaître des signes + dans les principales relations pratiques. Les enroulements ont été choisis de même sens, ce qui est *a priori* le plus naturel.

La première orientation est arbitraire : on a choisi le sens de parcours du circuit magnétique afin de pouvoir attribuer un signe au flux. La bobine primaire est ensuite orientée en concordance avec le circuit magnétique : un courant primaire positif crée un flux positif. Par contre, le secondaire est orienté de telle façon qu'un courant positif crée un flux négatif. Cela correspond à la réalité physique puisque le primaire magnétise le noyau tandis que le secondaire tend à le démagnétiser.

Pour les tensions, on utilise la convention récepteur pour le primaire (qui constitue un récepteur vis-à-vis de la source) et la convention générateur pour le secondaire (qui constitue un générateur vis-à-vis de la charge). Pour le primaire, on définit une force contre-électromotrice d'induction (une force contre-électromotrice positive tend à faire circuler un courant négatif) et pour le secondaire, on définit une force électromotrice (une force électromotrice positive tend à faire circuler un courant positif). Encore une fois, ce choix correspond au rôle réel des enroulements.

2.2 Transformateur idéal

Des hypothèses très simplificatrices permettent de rendre compte des propriétés essentielles du dispositif : c'est le modèle du transformateur idéal. On considère que le circuit magnétique a une réluctance nulle et n'est source d'aucune perte, et que les enroulements ont une résistance nulle.

La loi de Faraday exprime la force contre-électromotrice e'_1 du primaire en fonction du flux φ et du nombre de spires N_1 de cet enroulement :

$$e'_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt}$$

Le secondaire est traversé par le même flux, canalisé sans aucune fuite puisque la réluctance du circuit magnétique est nulle. La force électromotrice du secondaire s'exprime donc en fonction du flux φ et du nombre de spires N_2 de cette bobine :

$$e_2 = N_2 \frac{d\varphi}{dt}$$

Comme les enroulements n'ont pas de résistance, la tension u_1 appliquée au primaire est égale à la force contre-électromotrice :

$$u_1 = e'_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt}$$

Le flux est forcé : la tension de la source impose l'état magnétique du noyau.

La tension présente aux bornes du secondaire est égale à la force électromotrice induite :

$$u_2 = e_2 = N_2 \frac{d\varphi}{dt}$$

Le quotient des deux tensions est constant :

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{N_2}{N_1} = k$$

Le nombre k est appelé rapport de transformation de l'appareil. Certains auteurs préfèrent utiliser le quotient inverse m et écrire :

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{1}{m}$$

Si $k > 1$, le transformateur est élévateur, si $k < 1$, il est abaisseur et si $k = 1$, l'appareil est un transformateur d'isolement.

Comme la réluctance du circuit magnétique est nulle, la relation d'Hopkinson impose une condition sur le courant i_1 du primaire et le courant i_2 du secondaire qui s'écrit :

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = 0$$

soit :

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{k}$$

Le rapport des intensités est l'inverse de celui des tensions.

Pour établir les relations entre tensions et entre courants lorsque le transformateur est représenté par son symbole, il suffit de suivre ces deux règles : les tensions des extrémités pointées ont même polarité instantanée et les forces magnétomotrices sont munies d'un signe + dans la relation d'Hopkinson si la flèche d'orientation du courant entre par une extrémité pointée, et d'un signe – dans le cas contraire (*figure 2.6*).

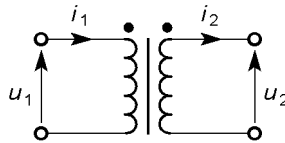


Figure 2.6 – Premier cas.

On remarque que l'on a inversé la position du secondaire par rapport à la disposition réelle. Cela n'a aucune importance puisque le circuit magnétique n'est plus représenté, mais que le sens relatif des bobinages est connu par le pointage.

La représentation est ainsi conforme aux habitudes pour un quadripôle (flèches des tensions vers le haut). Par application directe des règles précédentes, on écrit :

$$\frac{u_2}{u_1} = k$$

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{1}{k}$$

Trois autres cas sont possibles. Pour le deuxième (*figure 2.7*), on a :

$$\frac{u_2}{u_1} = -k$$

$$\frac{i_2}{i_1} = -\frac{1}{k}$$

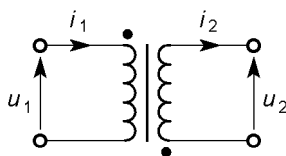


Figure 2.7 – Deuxième cas.

Pour le troisième cas (*figure 2.8*), on écrit :

$$\frac{u_2}{u_1} = k$$

$$\frac{i_2}{i_1} = -\frac{1}{k}$$

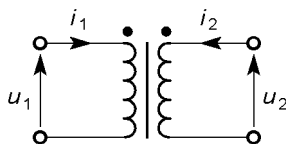


Figure 2.8 – Troisième cas.

Enfin, pour le quatrième cas (*figure 2.9*), on a :

$$\frac{u_2}{u_1} = -k$$

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{1}{k}$$

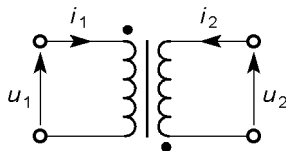


Figure 2.9 – Quatrième cas.

Quatre formes différentes peuvent ainsi être obtenues pour les deux relations de base d'un transformateur, selon les conventions de signe choisies. Dans la suite, nous nous placerons toujours dans le premier cas (signe + dans les deux relations).

Le transformateur idéal transmet l'énergie du primaire vers le secondaire sans aucune perte (rendement 100 %). En effet, la puissance instantanée appelée au réseau est :

$$p_1 = u_1 i_1$$

et la puissance fournie à la charge est :

$$p_2 = u_2 i_2$$

Compte tenu des relations entre tensions et entre courants, on a bien :

$$p_2 = ku_1 \frac{i_1}{k} = u_1 i_1 = p_1$$

Une propriété intéressante du transformateur idéal concerne le transfert d'une résistance en série avec le primaire vers le secondaire, ou l'opération inverse (*figure 2.10*).

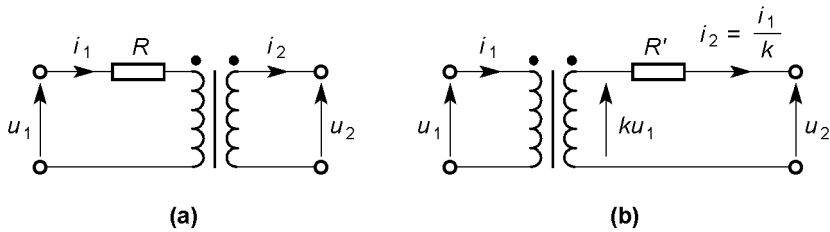


Figure 2.10 – Transfert d'une résistance du primaire vers le secondaire.

On peut écrire pour le circuit (a) :

$$u_2 = k(u_1 - Ri_1)$$

et pour le circuit (b) :

$$u_2 = ku_1 - R' \frac{i_1}{k}$$

Les deux relations sont identiques à condition que :

$$R' = k^2 R$$

On peut donc déplacer une résistance du primaire vers le secondaire, en multipliant sa valeur par le carré du rapport de transformation. Inversement, il est possible de déplacer une résistance du secondaire vers le primaire en divisant sa valeur par le carré du rapport de transformation. Ces deux propriétés sont également valables pour les inductances. Ces résultats sont utilisés pour modifier des schémas afin d'en faciliter l'emploi.

2.3 Transformateur réel

Le comportement des transformateurs s'écarte en plusieurs points de celui qui est prévu avec le modèle idéal. Tout d'abord, les enroulements présentent une certaine résistance, soit r_1 pour le primaire et r_2 pour le secondaire, ce qui conduit à des pertes par effet Joule. Ensuite, il existe des fuites de flux. Les lignes de champ ne se referment pas toutes dans le matériau ferromagnétique, certaines ont leur trajet partiellement dans l'air (*figure 2.11*).

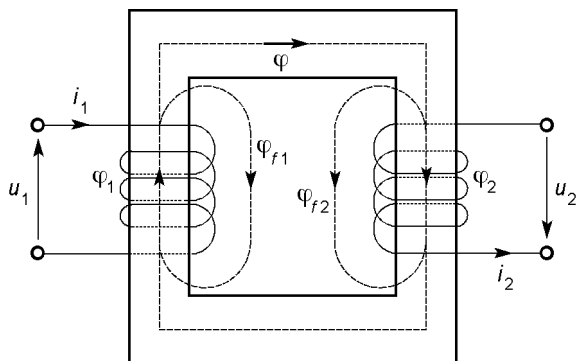


Figure 2.11 – Fuites de flux.

Le flux qui traverse le primaire est ainsi un peu différent de celui qui traverse le secondaire. En appelant φ le flux dans le circuit magnétique commun aux deux enroulements, φ_{f1} et φ_{f2} les flux de fuites pour le primaire et pour le secondaire, on peut exprimer les flux réels φ_1 et φ_2 dans les deux bobines :

$$\varphi_1 = \varphi + \varphi_{f1}$$

$$\varphi_2 = \varphi - \varphi_{f2}$$

Les réluctances des circuits magnétiques des fuites sont constantes car elles sont dues essentiellement à l'air (la réluctance de la partie ferromagnétique est très faible) et on peut écrire deux relations d'Hopkinson :

$$N_1 i_1 = \mathcal{R}_{f1} \varphi_{f1}$$

$$N_2 i_2 = \mathcal{R}_{f2} \varphi_{f2}$$

On en déduit l'expression de la force contre-électromotrice du primaire et celle de la force électromotrice du secondaire :

$$e'_1 = N_1 \frac{d\varphi_1}{dt} = N_1 \frac{d\varphi}{dt} + \frac{N_1^2}{\mathcal{R}_{f1}} \frac{di_1}{dt}$$

$$e_2 = N_2 \frac{d\varphi_2}{dt} = N_2 \frac{d\varphi}{dt} - \frac{N_2^2}{\mathcal{R}_{f2}} \frac{di_2}{dt}$$

On définit alors les inductances de fuites des deux bobines par :

$$l_1 = \frac{N_1^2}{\mathcal{R}_{f1}}$$

$$l_2 = \frac{N_2^2}{\mathcal{R}_{f2}}$$

On a ainsi :

$$\begin{aligned} e'_1 &= N_1 \frac{d\varphi}{dt} + l_1 \frac{di_1}{dt} \\ e_2 &= N_2 \frac{d\varphi}{dt} - l_2 \frac{di_2}{dt} \end{aligned}$$

Les lois des mailles appliquées aux circuits primaire et secondaire s'écrivent :

$$\begin{aligned} u_1 &= e'_1 + r_1 i_1 \\ u_2 &= e_2 - r_2 i_2 \end{aligned}$$

soit finalement :

$$\begin{aligned} u_1 &= N_1 \frac{d\varphi}{dt} + r_1 i_1 + l_1 \frac{di_1}{dt} \\ u_2 &= N_2 \frac{d\varphi}{dt} - r_2 i_2 - l_2 \frac{di_2}{dt} \end{aligned}$$

En toute rigueur, le flux ne dépend pas seulement de la tension de la source, mais aussi de l'intensité au primaire. Toutefois, dans la pratique, la chute de tension dans r_1 et l_1 reste faible par rapport à la tension appliquée. On peut continuer à considérer que le flux est imposé par la source qui alimente le primaire, bien que ce résultat ne soit qu'approché.

Le rapport des tensions n'est pas constant, mais on peut se ramener à la relation valable pour un transformateur idéal en ne considérant que les grandeurs :

$$u'_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt}$$

et :

$$u'_2 = N_2 \frac{d\varphi}{dt}$$

On a ainsi :

$$\frac{u'_2}{u'_1} = \frac{N_2}{N_1} = k$$

En ce qui concerne les courants, une autre modification apparaît car la réluctance du circuit magnétique est faible, mais n'est pas nulle. La relation d'Hopkinson s'écrit donc :

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = \mathcal{R} \varphi$$

Le rapport des courants n'est pas constant, mais on peut écrire :

$$i_1 = \frac{N_2}{N_1} i_2 + \frac{\mathcal{R} \varphi}{N_1}$$

Cette relation peut devenir :

$$i_1 = i_{1t} + i_0$$

en posant :

$$i_{1t} = k i_2 \quad \text{et} \quad i_0 = \frac{\mathcal{R} \varphi}{N_1}$$

i_{1t} est appelé courant de travail ou courant utile, car c'est lui qui assure le transfert d'énergie du primaire vers le secondaire.

Le transformateur réel peut être décrit par un schéma équivalent pour rendre compte de l'ensemble des imperfections (figure 2.12).

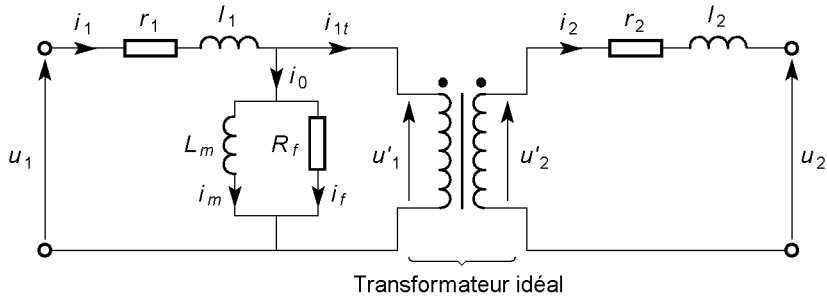


Figure 2.12 – Schéma équivalent du transformateur réel.

Ce modèle fait intervenir un transformateur idéal fictif, associé à des résistances et des inductances. Les lois des mailles pour l'entrée et la sortie du circuit donnent bien :

$$u_1 = u'_1 + r_1 i_1 + l_1 \frac{di_1}{dt}$$

$$u_2 = u'_2 - r_2 i_2 - l_2 \frac{di_2}{dt}$$

Le transformateur idéal assure les relations :

$$u'_2 = k u'_1$$

$$i_{1t} = k i_2$$

La branche placée en parallèle sur le primaire permet d'avoir :

$$i_1 = i_{1t} + i_0$$

Si la réluctance du circuit magnétique était constante, cette branche ne comporterait qu'une bobine idéale d'inductance :

$$L_m = \frac{N_1^2}{\mathcal{R}}$$

On aurait bien :

$$u'_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt} = L_m \frac{di_0}{dt}$$

Cependant, les non-linéarités du matériau magnétique (saturation et hystérésis) compliquent les choses. Les effets magnétiques et énergétiques peuvent toutefois être correctement décrits en modélisant la branche considérée par une inductance L_m en parallèle avec une résistance R_f . Ce dernier élément permet de rendre compte des pertes ferromagnétiques (dus à l'hystérésis et aux courants de Foucault). La justification précise de cette représentation sera faite au paragraphe suivant dans le cas particulier d'une tension d'alimentation sinusoïdale.